

EFEITO DOS PARÂMETROS DE TORNEAMENTO NO ACABAMENTO SUPERFICIAL DO FERRO FUNDIDO MESCLADO COM GRAFITA NODULAR.

John Ferney Alvarez Rosário

Laboratório de Fenômenos de Superfície, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo EP-USP, Av. Professor Mello Moraes, 2231 - Cidade Universitária CEP. 05.508-900 - São Paulo/SP Brasil. john.rosario@poli.usp.br

Roberto Martins de Souza

Laboratório de Fenômenos de Superfície, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo EP-USP, Av. Professor Mello Moraes, 2231 - Cidade Universitária CEP. 05.508-900 - São Paulo/SP Brasil. roberto.souza@poli.usp.br

Amauri Hassui

Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo EP-USP, Av. Professor Mello Moraes, 2231 - Cidade Universitária CEP. 05.508-900 - São Paulo/SP Brasil. amauri.hassui@poli.usp.br

Resumo: *Neste estudo analisou-se a influência da variação dos parâmetros de torneamento no acabamento superficial do ferro fundido mesclado com grafita nodular, considerando a heterogeneidade microestrutural das peças usinadas. Foram utilizadas ferramentas de metal duro, variando-se a velocidade de corte e o avanço e os torneamentos foram feitos em dois diâmetros diferentes da peça. O acabamento superficial foi avaliado através dos parâmetros de rugosidade R_a , R_q e R_v . As diferenças microestruturais foram avaliadas com o uso da metalografia quantitativa por análise de imagem, quantificando a fração volumétrica dos microconstituintes. Medições de macro dureza foram feitas ao longo do diâmetro da peça e, da mesma forma, foi avaliada a microdureza da matriz metálica. Os resultados permitiram relacionar os parâmetros de corte e as características microestruturais do material com a qualidade superficial. O objetivo deste artigo é apresentar resultados preliminares para determinar quais as melhores condições de usinagem que produzem uma superfície adequada após o torneamento de acabamento do ferro fundido mesclado com grafita nodular.*

Palavras Chave: *ferro fundido mesclado, grafita nodular, torneamento, microestrutura, rugosidade.*

1. INTRODUÇÃO.

A fabricação de peças e componentes de máquinas a partir de ligas metálicas de ferro fundido representa a maior parcela de peças fundidas no mundo⁽¹⁾. A partir da segunda metade da década de 70, a produção de ferro fundido nodular no Brasil teve um aumento considerável, o que coloca o país em posição de destaque no mercado dos ferros fundidos em geral. Diversas pesquisas têm sido desenvolvidas baseadas na crescente importância que os ferros fundidos vêm assumindo em decorrência do próprio desenvolvimento do país, na tentativa de conhecer melhor tanto a tecnologia de fabricação, como as aplicações destas ligas^(1,2,3).

O termo ferro fundido representa uma grande família de ligas ferrosas, mas que, de maneira geral, podem ser definidas como ligas a base de ferro – carbono - silício, que se solidificam com

reações eutéticas, e que geralmente contém Mn, P, S, entre outros elementos⁽¹⁾. Nos ferros fundidos em geral as propriedades dependem da microestrutura, e esta nos mesclados em particular depende fortemente do balanço entre variáveis de processo e composição química. As propriedades mecânicas dos ferros fundidos estão condicionadas à estrutura final obtida, isto é, dependem da matriz metálica, da morfologia e quantidade de grafita e ainda do tamanho e distribuição das células eutéticas⁽²⁾.

A literatura denomina de mesclado, o ferro fundido que apresenta uma microestrutura misturada de regiões de carboneto eutético (ferro fundido branco) e grafita em veios (ferro fundido cinzento), decorrentes da solidificação⁽¹⁾. A região com ferro fundido cinzento se solidifica conforme o sistema estável (austenita – grafita), e a região com ferro fundido branco segundo o metaestável (austenita – carboneto). No presente trabalho, o material de estudo é formado de diferentes regiões de ferro fundido branco, matriz metálica perlítica e grafita nodular decorrentes da solidificação, como resultado da adição de elementos de liga nodulizantes e formadores de carbonetos eutéticos, sem efetuar nenhum tratamento térmico após da solidificação. O material pode ser considerado dentro da categoria mais adequada de acordo com o mecanismo de solidificação, que é a dos ferros fundidos mesclados. Entretanto, é importante lembrar que esta classificação considera a morfologia da grafita em veios, que é característica nos ferros fundidos cinzentos. Por este motivo, foi adotada a denominação de ferro fundido mesclado com grafita nodular.

Algumas variáveis da usinagem dos ferros fundidos estão relacionadas com as características do material no que se refere à formação de trincas e defeitos superficiais, principalmente quanto à quantidade, forma, tamanho e dureza relativa de heterogeneidades, além das diferenças de dureza induzidas por tratamento térmico e endurecimento por deformação⁽⁴⁾.

A qualidade das superfícies usinadas é um fator importante no desempenho de diferentes elementos de máquinas. Os principais fatores que afetam o acabamento superficial nos processos de usinagem são as condições de parâmetros de corte, a classe e geometria da ferramenta e a rigidez do sistema máquina-peça-sistema de fixação. A rugosidade é um critério tradicionalmente usado como indicador do acabamento superficial, proporcionando informações da topografia das superfícies usinadas.

Objetiva-se neste trabalho o início de uma discussão sobre a influência dos parâmetros de corte no torneamento do ferro fundido mesclado com grafita nodular, considerando a heterogeneidade microestrutural do material e as conseqüentes diferenças nas propriedades mecânicas. Este trabalho representa a fase inicial de um projeto de mestrado a ser desenvolvido no Laboratório de Fenômenos de Superfície da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LFS-EP-USP). Ao longo de todo o projeto, espera-se estudar o desgaste de ferramentas de corte na usinagem dos ferros fundidos mesclados com grafita nodular, com auxílio da técnica de análise das vibrações na ferramenta. Com estes testes preliminares visa-se determinar quais as condições de operação que garantem a qualidade das superfícies no torneamento do ferro fundido mesclado com grafita nodular. A realização deste trabalho justifica-se devido às dificuldades de se achar ferramentas de corte comerciais e condições de catálogo específicas para a usinagem destes ferros fundidos.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios de torneamento foram feitos em corpos-de-prova cilíndricos de ferro fundido mesclado com grafita nodular, com diâmetro de 150 mm, e comprimento de 100 mm. Os corpos-de-prova foram obtidos por fundição convencional, com a composição química apresentada na tabela 1, e depois sofreram uma pré-usinagem até os diâmetros de 140 mm e 90 mm. O ferramental utilizado, disponível comercialmente, foi cedido pela Sandvik Brasil. As pastilhas são de metal-duro da Classe KR 3015, revestidas, com geometria TNMA 160412. O porta ferramentas utilizado foi um modelo Coroturn RC para torneamento longitudinal DTG NR 2525M16 - Kr91⁰. Os ensaios de usinagem foram feitos, sem o uso de fluido de corte.

Tabela 1. Composição Química dos Corpos-de-prova.

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Mg
3,30 - 3,40	1,60 - 1,70	0,40 - 0,45	0,075	0,015	0,78 - 0,83	2,80 - 2,90	0,40 - 0,45	0,040 - 0,060

Após a preparação dos corpos-de-prova até as dimensões acima descritas, as operações de torneamento foram executadas de acordo com as condições de usinagem mostradas na tabela 2, e usando para todos os ensaios uma profundidade de corte (a_p) de 0,3 mm. Foram feitos ensaios em diâmetros diferentes por que a microestrutura do material varia bastante em função deste parâmetro. Foi feito faceamento dos corpos-de-prova para obter superfícies paralelas e regulares nas faces. Os ensaios foram feitos utilizando um torno convencional da marca ROMI, modelo S-30.

Tabela 2. Parâmetros de corte utilizados.

Diâmetro usado (mm)	Velocidade de corte, Vc (m/min)	Avanço, f (mm/rev)
90	80	0,1
	60	0,1
	80	0,2
140	80	0,1
	60	0,1
	80	0,2

Após os ensaios de usinagem e mediante o corte das peças com o uso de disco abrasivo, foram obtidas amostras em cortes transversais ao longo do diâmetro dos corpos-de-prova e foi levantado o perfil de durezas em durômetro Buehler, modelo VMT 7. Após o corte, foi feita preparação metalográfica das amostras. As amostras depois de lixadas e polidas, foram atacadas com nital 3% durante 3 segundos para destacar os carbonetos na microestrutura. As imagens das amostras foram obtidas no microscópio óptico com módulo de aquisição de imagens, Olympus BX60M. Mediante o uso da metalografia quantitativa por análise de imagem digitalizada no software Leica Qwin, foi quantificada a fração volumétrica dos micro-constituintes. Paralelamente, as amostras preparadas previamente foram levadas ao microdurômetro micromet, modelo 2100, onde foi avaliada a dureza da matriz ao longo do diâmetro da peça.

Os valores de rugosidade das superfícies foram obtidos calculando-se o valor médio de quinze medições feitas no sentido de avanço da ferramenta de corte para cada condição de usinagem, como indicado na figura 1. As medidas de rugosidade foram feitas em rugosímetro Surfscorder SE1700 α - Kosaka Lab. Os parâmetros analisados foram Ra, Rq e Rv.

A topografia das superfícies foi observada mediante o uso da lupa Nikon SNV800, do microscópio eletrônico de varredura MEV, e do microscópio óptico Olympus BX60M.

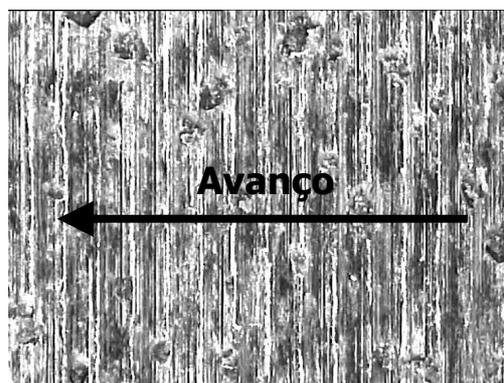


Figura 1. Direção de avaliação da rugosidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise de Rugosidade e Topografia.

O Ra é um dos parâmetros mais utilizados para caracterizar a rugosidade de uma superfície. Contudo, superfícies usinadas com mesmo valor de Ra podem apresentar perfis diferentes⁽⁵⁾. O parâmetro Rq, junto com o Ra, faz parte do grupo de parâmetros de rugosidade médios. O Rq é a raiz média quadrática da rugosidade média (rms). Para perfis de rugosidade na forma de onda senoidal simples, o Rq é proporcional ao Ra, mas, na realidade, tais perfis são muito mais complexos. Nos processos convencionais de usinagem o Ra é o parâmetro mais empregado para caracterizar a rugosidade das superfícies, mas o uso do Rq apresenta importância nas aplicações ópticas, nas quais o parâmetro relaciona-se com a qualidade óptica da superfície⁽⁶⁾.

O parâmetro Rv informa a profundidade do vale mais profundo do perfil de rugosidade no comprimento de medição. Rv, Rt e Rp são considerados parâmetros de extremo, e são de muita utilidade em casos onde se tem interesse na identificação de condições pouco usuais no perfil. Esses parâmetros informam, por exemplo, a existência de uma aspereza muito aguda ou uma rebarba que possa comprometer a vedação de duas superfícies, ou, no caso onde há trincas ou riscos na superfície, podem indicar baixa usinabilidade de um material ou condições de usinagem inadequadas⁽⁶⁾. Na tabela 3 são apresentados os parâmetros Ra, Rq e Rv das superfícies, resultado da média de 15 medições de rugosidade para cada uma das diferentes condições de corte.

Tabela 3 – Leituras dos parâmetros de rugosidade das amostras.

Dímetro (mm)	Vc (m/min)	f (mm/rot)	Ra (μm)	Rq (μm)	Rv (μm)
90	80	0,1	$0,90 \pm 0,066$	$1,37 \pm 0,016$	$8,27 \pm 1,570$
	60	0,1	$2,19 \pm 0,155$	$2,73 \pm 0,195$	$12 \pm 1,080$
	80	0,2	$1,67 \pm 0,064$	$2,06 \pm 0,093$	$6,77 \pm 0,872$
140	80	0,1	$1,29 \pm 0,132$	$1,78 \pm 0,248$	$8,86 \pm 2,043$
	60	0,1	$1,48 \pm 0,099$	$1,98 \pm 0,148$	$8,56 \pm 1,120$
	80	0,2	$1,28 \pm 0,070$	$1,80 \pm 0,131$	$8,75 \pm 1,488$

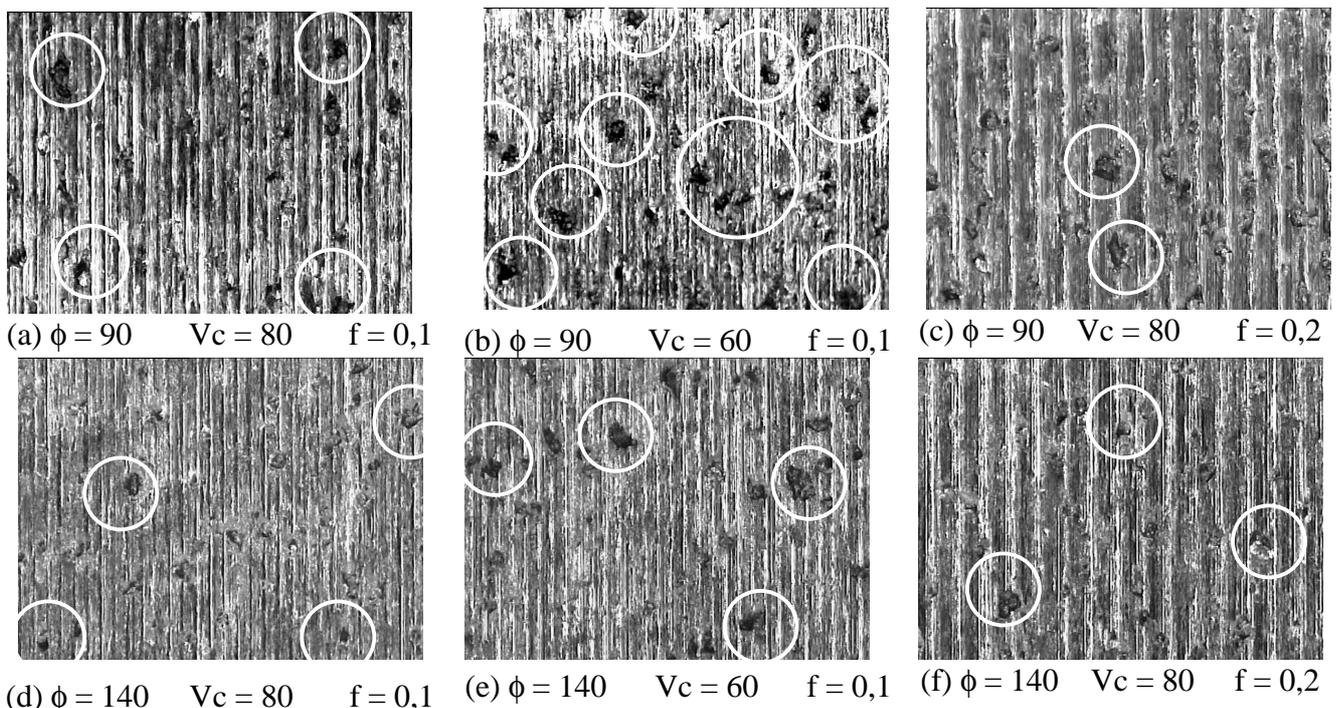


Figura 2. Imagens das superfícies usinadas obtidas por Lupa. Os círculos brancos destacam alguns danos na superfície.

As figuras 2a, 2b e 2c apresentam as imagens das superfícies geradas no diâmetro de 90 mm com as diferentes condições de usinagem. Na figura 2b, pode-se observar repetidas crateras e danos na superfície, conforme indicado pelos círculos. Ou seja, são para as condições da figura 2b que se tem a superfície mais prejudicada pela usinagem e com o pior acabamento, o qual é ratificado com maiores valores de Ra e Rv. Na figura 2c é apresentada a imagem da superfície menos deteriorada, que corresponde ao menor Rv, porém com valores maiores de Ra e Rq em relação à figura 2a, que condiz com a teoria, ou seja, maiores avanços geram maiores rugosidades médias. Na figura 3a apresenta-se a condição da superfície onde se têm os menores valores de Ra e Rq, mas isso não implica que seja esta a superfície menos deteriorada.

As figuras 2d, 2e, e 2f apresentam o resultado da análise das superfícies usinadas com diâmetro de 140 mm. Observa-se que a qualidade das superfícies neste diâmetro não apresenta muita diferença. Isto pode ser conferido com os valores de rugosidade, que são quase constantes. É interessante observar que para as mesmas condições de usinagem, nos diâmetros diferentes, tanto a qualidade das superfícies como a rugosidade apresenta diferenças. Acredita-se que estas diferenças possam estar relacionadas com as heterogeneidades características na microestruturas do ferro fundido mesclado com grafita nodular.

3.2 Influencia da microestrutura

3.2.1 Influencia da heterogeneidade microestrutural na rugosidade

Devido às diferenças nas taxas de resfriamento nos diâmetros das peças fundidas, a nucleação e crescimento dos micro-constituintes, são diferentes também. A fração volumétrica da grafita e dos carbonetos foi avaliada ao longo do diâmetro mediante o uso de metalografia quantitativa e análise de imagem. A dureza foi medida ao longo do diâmetro e expressada em função da fração volumétrica dos micro-constituintes, na figura 3. A dureza da matriz foi avaliada e pode-se considerar constante em toda a peça.

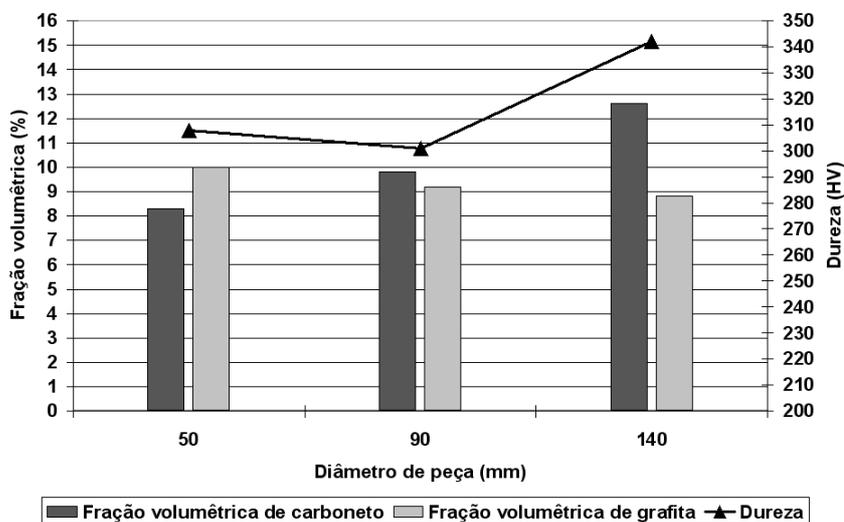


Figura 3. Variação da dureza e da fração volumétrica dos microconstituintes em diferentes diâmetros da peça.

Pode-se observar na figura 3, que as propriedades do ferro fundido mesclado, e mais propriamente a dureza, não são constantes em toda a peça. Além disso, há uma dependência entre a fração volumétrica de grafita e carbonetos com o diâmetro. A maior diferença na dureza da peça encontra-se nos diâmetros 90 mm e 140mm, assim as superfícies foram estudadas nesses diâmetros. As diferenças na fração volumétrica dos microconstituintes podem ter influência na qualidade superficial, o qual pode ser observado comparando as rugosidades e observando as imagens das diferentes superfícies usinadas. Uma imagem da microestrutura do ferro fundido mesclado com grafita nodular é apresentada na figura 4.

Ao avaliar a rugosidade da peça após ser usinada com os mesmos parâmetros de corte, mas considerando-se as variações devidas às diferenças nas propriedades do material ao longo do diâmetro (Figuras 5a, 5b e 5c), pode-se observar que a rugosidade apresenta mudanças na maioria dos casos.

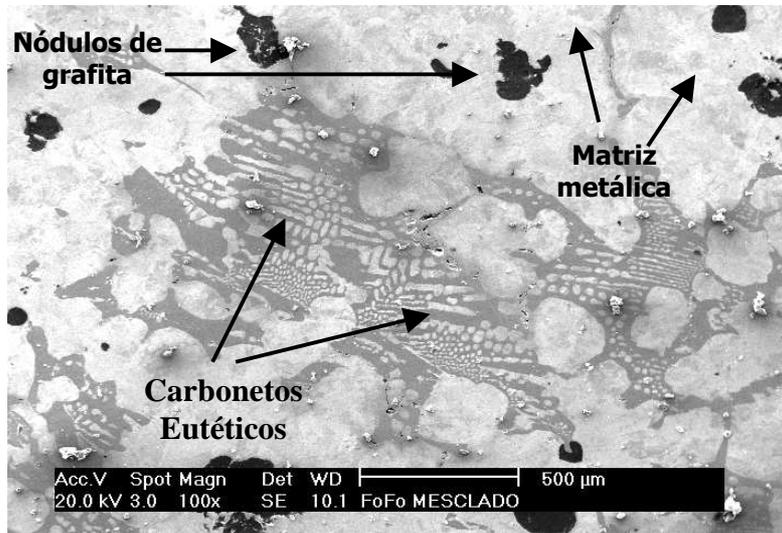


Figura 4. Microestrutura do ferro fundido mesclado.

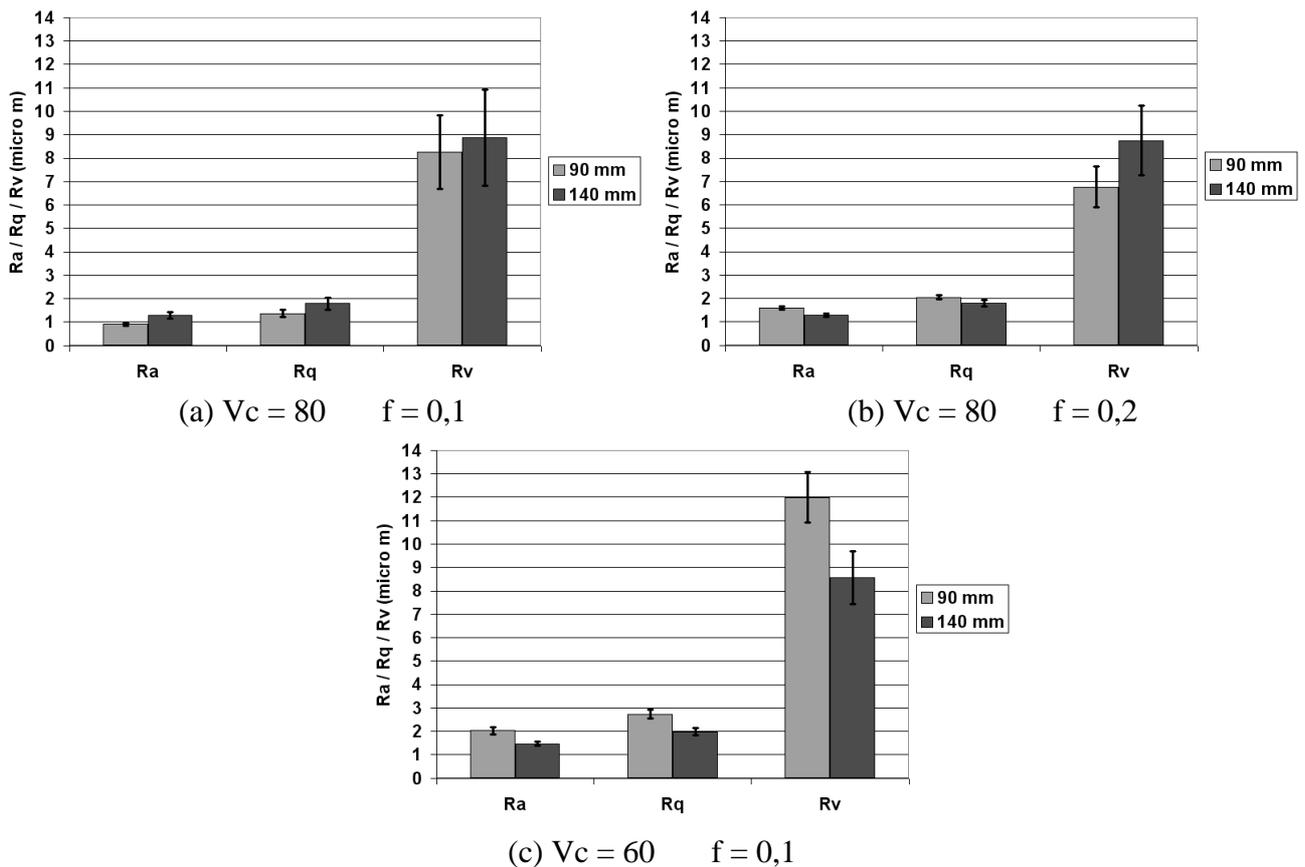


Figura 5 – Influência do diâmetro da peça usinada na rugosidade.

3.3 Influencia dos Parâmetros de Corte.

3.3.1 Influencia do Avanço na Rugosidade

Segundo a literatura, a rugosidade média varia de forma diretamente proporcional ao quadrado do avanço e inversamente proporcional ao raio de ponta da ferramenta. Porém, no intervalo

investigado, as influências do avanço no Ra, Rq e o Rv não são muito significativas quando a peça foi usinada no diâmetro de 140 mm. Entretanto, no diâmetro de 90 mm teve-se uma variação considerável dos parâmetros, especialmente no Rv, quando variou-se o avanço.

Na figura 6a pode-se observar que quando o avanço é aumentado, os parâmetros de rugosidade Ra, Rq aumentam, enquanto o Rv diminui. Na figura 6b a variação nos parâmetros é pequena de uma condição para a outra. Isso mostra que a microestrutura do material da peça teve uma influência tão grande ou maior do que do o avanço na rugosidade. Nota-se na figura 6 que os valores de Ra e Rq (parâmetros de médias) apresentam-se muito parecidos para os dois diâmetros, mas o parâmetro Rq, mostrou-se maior quando o maior avanço foi utilizado. Maiores avanços implicam em condições mais severas de corte, que provavelmente removem carbonetos inteiros da peça e/ou destacam os nódulos de grafita.

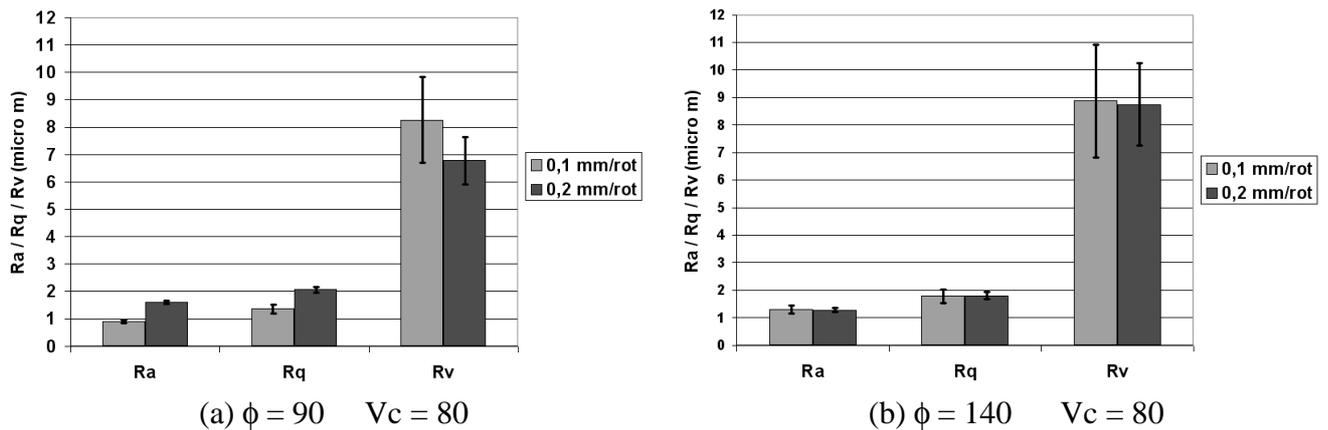


Figura 6 – Influência da velocidade de corte na rugosidade.

3.3.2 Influencia da Velocidade de Corte na Rugosidade

Em geral, espera-se que um aumento na velocidade de corte leve a uma diminuição da rugosidade⁽⁶⁾. No intervalo estudado, e apresentado na figura 7, para o diâmetro de 90 mm o aumento da velocidade de corte gera uma queda considerável na rugosidade. Cabe lembrar que esse diâmetro apresenta uma maior quantidade de grafita e menor de carbonetos. No diâmetro de 140 os parâmetros permanecem praticamente inalterados.

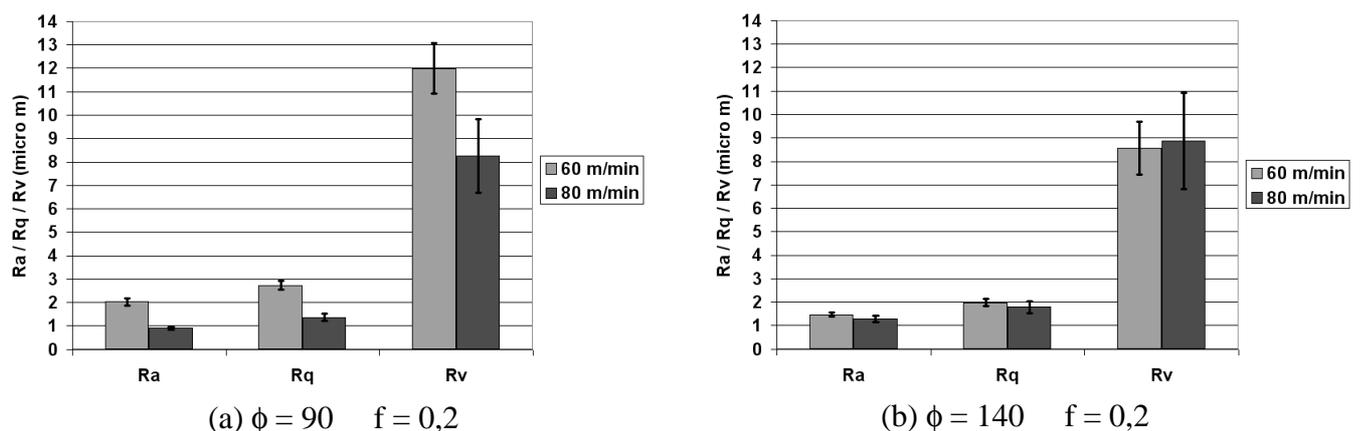


Figura 7 – Influência do avanço na rugosidade.

4. Conclusões

Através da análise dos resultados dos ensaios, pode-se concluir que:

- As superfícies da peça de ferro fundido mesclado com grafita nodular tiveram diferentes características quando usinadas com os iguais parâmetros de corte, e a diferentes diâmetros. Isto é decorrente das diferenças microestruturais no material.
- Para o diâmetro de 90 mm, a melhor combinação dos parâmetros de corte estudados, é obtida utilizando-se uma profundidade de corte de 0,3 mm, uma velocidade de corte de 80 m/min, e um avanço de 0,1 mm/rot. Com esses parâmetros se tem a rugosidade Ra mais baixa, combinada com pouco dano superficial e Rv menor.
- Para o diâmetro de 140 mm, a combinação de velocidade de corte de 80 m/min com qualquer um avanço de 0,1 ou 0,2 mm/rot pode ser utilizada. O que quer dizer que a variação do avanço não tem muita influência quando usinado neste diâmetro.
- O acabamento superficial foi muito influenciado pela variação da velocidade de corte. Com uma diminuição na mesma a superfície fica com pior acabamento, o qual foi refletido com Ra maior. A qualidade da superfície ficou mais comprometida com a diminuição na velocidade de corte, quando usinada no diâmetro de 90 mm.
- O Ra e Rq têm o mesmo comportamento nas superfícies estudadas, e conservam uma certa proporcionalidade. Isto quer dizer que os perfis apresentam uma forma de onda próxima de um senoidal simples. O Rv reflete o dano nas superfícies usinadas.
- No ferro fundido mesclado com grafita nodular o acabamento superficial é influenciado tanto pela microestrutura quanto pelos parâmetros de usinagem. Portanto, a obtenção de um melhor acabamento passa pela obtenção de uma microestrutura melhor, juntamente com escolhas adequadas das condições de usinagem.

5. Agradecimentos

Manifestamos os nossos agradecimentos às empresas Sandvik Brasil e Aços Villares Sidenor pelos materiais concedidos.

6. Referências Bibliográficas

1. SOUZA SANTOS, A.B.; CASTELLO BRANCO, C.H.; **Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, São Paulo, 1989. 205 p.
2. Nunes, R.C. et al. **Estudo do efeito das variáveis de processo na dureza do ferro fundido nodular com auxílio do planejamento de experimentos**. 57^o Congresso Anual Internacional da ABM Julho, 2002 São Paulo – SP – Brasil.
3. Silva, A.P. et al, **Influência da velocidade de resfriamento em propriedades do ferro fundido nodular austemperado (ADI)**. 57^o Congresso Anual Internacional da ABM Julho, 2002 São Paulo – SP – Brasil.
4. Shaw. **Metal Cutting Principles**. Clarendon, Great Britain. 590 p.
5. Gadelmawla, E.S. et al. **Roughness parameters**. Journal of Materials Processing Technology 123 (2002) 133-145.
6. HIOKI, D. et al. **Caracterização tribológica de superfícies usinadas por fresamento do aço ABNT 4140**. 59^o Congresso Anual Internacional da ABM Julho, 2004 São Paulo – SP – Brasil.

Effects of turning parameters on surface quality of the mottled iron cast with nodular graphite.

John Ferney Alvarez Rosario

Surface Phenomena Laboratory, Mechanical Engineering Department, University of São Paulo, Escola Politécnica, Avenida Prof. Mello Moraes 2231, 05508-900 São Paulo, Brazil.
john.rosario@poli.usp.br

Roberto Martins de Souza

Surface Phenomena Laboratory, Mechanical Engineering Department, University of São Paulo, Escola Politécnica, Avenida Prof. Mello Moraes 2231, 05508-900 São Paulo, Brazil. roberto.souza@poli.usp.br

Amauri Hassui

Mechanical Engineering Department, University of São Paulo, Escola Politécnica, Avenida Prof. Mello Moraes 2231, 05508-900 São Paulo, Brazil. amauri.hassui@poli.usp.br

Abstract : *In this work it was analyzed the turning parameters influence in the surface finishing of mottled cast iron, considering the machined workpiece microstructure heterogeneity. They were used carbide cutting tools, varying the cutting speed and feed rate, besides the turning operation was done in two different diameters of the workpiece. The surface finishing was evaluated by the roughness parameters R_a , R_q and R_v . The microstructure difference was evaluated using quantitative metallography by image analysis, quantifying the volumetric fraction of the microconstituents. The macro hardness measurement were done around the workpiece diameter and, in the same way, it was evaluated the microhardness of the metallic matrix. The results allowed relating the cutting parameters and the microstructure characteristics of the material with the surface quality. The objective of this work is to present preliminary results to determine the best cutting conditions aiming the production of suitable surfaces after the finishing turning of the mottled cast iron.*

Keywords: mottled iron cast, nodular graphite, turning, microstructure, roughness.